

А.В. Кондратьєв¹, О.В. Андрєєв²

¹ Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

² Державне підприємство «Антонов», Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ КОМПОЗИТА НА ОСНОВІ ПРЕФОРМ В ЕЛЕМЕНТАХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

В даний час в багатьох галузях широко застосовуються плетені композитні конструкції різного призначення. Використання таких преформ дозволяє забезпечити можливість автоматизації виробництва, високу швидкість і економічність процесу виготовлення полімерних композиційних матеріалів та конструкцій на їх основі. Знання їх властивостей під час проектування дозволяє оптимізувати випуск конструкцій з необхідними параметрами. В роботі дістала подальшого розвитку модель композиційного матеріалу на основі плетеної арматури, для практичної реалізації якої досить провести випробування зразків матеріалу із трьома різними кутами між джгутами, наприклад, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ і $\pm 60^\circ$. Наведено математичний опис моделі, що дав можливість спрогнозувати фізико-механічні характеристики композиційного матеріалу при його викладенні на криволінійні поверхні. Синтезовані розрахункові параметри на відмінну від існуючих дозволяють прогнозувати характеристики міцності композита на основі плетених рукавів залежно від позиціонування й розташування матеріалу на формотвірній поверхні. Отримані результати є основою для вирішення задач розрахунку на міцність будівельних конструкцій із композиційних матеріалів на основі плетених преформ.

Ключові слова: преформа, премікс, армуючий матеріал, кут між джгутами, критерій міцності, випробування.

Постановка проблеми

Сучасні полімерні композиційні матеріали, а також конструкції та вироби з них знаходять у всьому світі широке застосування в будівельному комплексі [1]. Застосування цих матеріалів дозволяє зменшити масу будівельних конструкцій, підвищити корозійну стійкість до впливу несприятливих кліматичних факторів, продовжити міжремонтні терміни, виконувати ремонт і посилення конструкцій з мінімальними витратами ресурсів і часу [2, 3]. Виробництво композитних конструкцій складного профілю за допомогою стандартних технологій стає проблематичним через складність розкрою композиційного матеріалу та необхідності застосування ручного викладання в зонах складних переходів. Одним із вирішень даної проблеми може бути використання плетеної арматури або преформ (преміксів), які характеризуються високою рухливістю ниток і здатністю створювати криволінійні поверхні складної форми [4].

Основними галузями застосування плетених преформ (крім традиційно найбільше аерокосмічної [5]) є машинобудування, будівництво, виробництво товарів спорту та відпочинку і виробів медичного призначення [6].

Одним із прикладів застосування плетених преформ у будівельній індустрії може бути їхнє вико-

ристання для виготовлення аркових елементів бетонно-композитних мостів [7, 8]. Такі елементи являють собою конструкції, які швидко будуються, із заливанням бетону в незнімну опалубку на основі плетених преформ, отриману на місці будівництва [9, 10].

Гібридно-композитна система будівництва мостів забезпечує довговічність і функціональні переваги в порівнянні із залізобетонними та сталевими конструкціями [6, 7]. Порівняння будівництва та наступної експлуатації мостів різної конструкції за життєвий цикл (20 років) показано на рис. 1 [7].

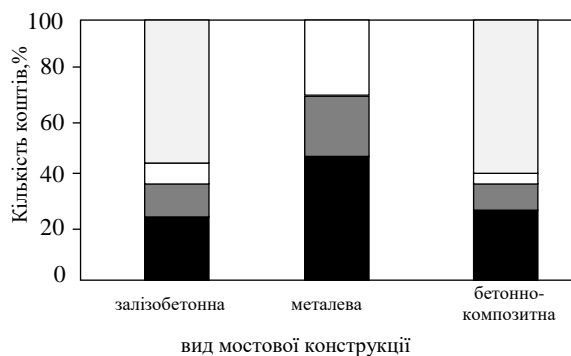


Рис. 1. Порівняння будівництва та експлуатації мостів різної конструкції по статтях витрат [7]:

□ – економія коштів; □ – експлуатація;
■ – будівництво; ■ – комплектація

Для застосування плетеної арматури у якості армуючого матеріалу важливим завданням є визначення характеристик міцності пакета композиційного матеріалу, який вона утворює.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження в галузі проектування, виготовлення та вивчення характеристик префом і матеріалів на їхній основі ведуться різними фірмами та інститутами, такими як Albany Engineering Composites (США), Tomi-Tech (Японія), BPM (США), 3d D Wovens (Туреччина), ФДУП «ВІАМ» (РФ), J.H. Von Baur Soln GmbH and Co. KG (Німеччина) та ін. [11, 12].

У роботі [13] описана можливість виготовлення багатофункціональних армуючих елементів для бетонних конструкцій на основі плетених форм. Армуючі елементи крім основної функції армування бетону здійснюють також моніторинг напружено-деформованого стану бетонних елементів.

У роботах [14, 15] показано, що зі збільшенням кута плетіння зменшуються фізико-механічні характеристики в поздовжньому напрямку. При прикладанні навантаження в поперечному напрямку спостерігається збільшення міцності та модулів пружності на розтягування та стискання. Отримані результати дозволили авторам дати практичні рекомендації щодо виготовлення преформи, схема армування якої оптимально адаптована до виду навантаження. Аналогічні висновки отримані в роботі [16], де представлено результати механічних випробувань зразків, виготовлених з використанням преформ на основі вуглецевого наповнювача та епоксидних зв'язуючих.

У роботі [17] запропоновано експериментальну методику визначення розривних характеристик при одноісним розтягуванні плетених рукавів, що відрізняється від стандартної підготовкою проб для випробувань та введенням нових характеристик: відносного розривного навантаження та вимірів лінійних розмірів по ширині. На підставі цього встановлено вплив переплетення на розривні характеристики плетених полотен.

У роботі [18] описана методика прогнозування структурних параметрів композитів на основі плетених рукавів – кута армування та об'ємного вмісту волокон. Авторами ряду робіт [19, 20] розроблені комп'ютерні системи, які дозволяють визначати величину кута армування плетених преформ. Точність таких обчислень підтверджена результатами аналізу зображень плетених структур із заданими параметрами [21].

Незважаючи на корисність цих характеристик, вони недостатні для розв'язання низки завдань визначення напружено-деформованого стану плетеної арматури та аналізу її міцності, які базуються на

пружних константах (модулі пружності, зсуву, коефіцієнти Пуассона та інші) і характеристиках міцності [22].

У роботі [23] наведено аналіз можливих підходів до моделювання фізико-механічних характеристик композита, армованого плетеним рукавом, і виявлено фактори, які не дозволяють застосовувати існуючі теоретичні моделі шаруватих середовищ. На підставі цього розроблена експериментальна методика прогнозування пружних характеристик і властивостей міцності композита, армованого плетеним рукавом [24].

Певний інтерес представляє застосування стрижневої моделі симетрично-армованих композитів [25] для прогнозування властивостей розглянутого матеріалу. Формально методика визначення пружних характеристик композитів з армуванням $\pm\phi$ базується на тих же фундаментальних властивостях моношара, що й класична теорія шаруватих середовищ [26], тому використання стрижневої моделі [25] обмежується рядом припущень даної теорії.

Формулювання мети та завдання дослідження

У зв'язку зі сказаним вище, актуальними є дослідження з розробки методики розрахунків характеристик міцності композита на основі плетених рукавів залежно від позиціонування й розташування матеріалу на формотвірній поверхні. Для досягнення цієї мети вирішувалася наступна задача: виведення розрахункових параметрів для прогнозування характеристик міцності композита на основі плетених рукавів залежно від ступеня та характеру деформування рукава, тобто від кута між джгутами.

Основна частина дослідження

Як показано в роботах [23, 24], армування композитних конструкцій плетеними рукавами приводить у загальному випадку до змінних структурних параметрів і, як наслідок, до змінюваних залежно від кута ϕ пружних властивостей композиційного матеріалу.

У цих роботах запропонована й обґрунтована універсальна математична модель для прогнозування пружних властивостей композитів на основі плетених рукавів, для практичної реалізації якої досить провести випробування зразків матеріалу із трьома різними кутами між джгутами, наприклад, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ і $\pm 60^\circ$ (рис. 2).

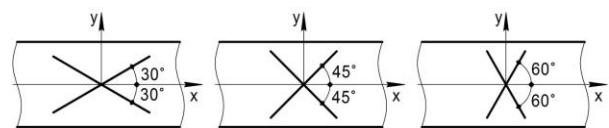


Рис. 2. Зразки для експериментальних досліджень пружних констант

Крім пружних властивостей при випробуванні зразків, показаних на рис. 2, можна визначити і границі міцності при розтягуванні F_{xp} (F_{30}^p , F_{45}^p і F_{60}^p) і при стисканні F_{xc} (F_{30}^c , F_{45}^c і F_{60}^c) по осі x . Для оцінки міцності композиційного матеріалу при інших кутах φ , а також у випадках використання плетених рукавів у якості додаткового армуючого матеріалу, необхідно знати границі міцності умовних моношарів, тобто величини F_{1p} , F_{1c} , F_{2p} , F_{2c} і F_{12} , які принципово не можуть бути визначені через неможливість армування композиційний матеріал у напрямках 0° і 90° .

Розглянутий композит, що формально складається із двох шарів, є статично невизначеною системою. Для оцінки напружень у шарах справедливий формули загального виду [25, 26]

$$\begin{aligned}\sigma_1^{(i)} &= \sigma_x^{(i)} \cos^2 \varphi_i + \sigma_y^{(i)} \sin^2 \varphi_i + \tau_{xy}^{(i)} \sin 2\varphi_i; \\ \sigma_2^{(i)} &= \sigma_x^{(i)} \sin^2 \varphi_i + \sigma_y^{(i)} \cos^2 \varphi_i - \tau_{xy}^{(i)} \sin 2\varphi_i; \\ \tau_{12}^{(i)} &= (\sigma_y^{(i)} - \sigma_x^{(i)}) \sin \varphi_i \cos \varphi_i + \tau_{xy}^{(i)} \cos 2\varphi_i.\end{aligned}\quad (1)$$

Порівняємо теоретично прогнозовані границі міцності з експериментальними даними для випробовуваних зразків (рис. 2). Врахуємо, що в цьому випадку можна скористатися властивістю симетрії структури композиційного матеріалу (рис. 2) і вважати, що при розтягуванні по осі x ($\sigma_x \neq 0$, $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$) обоє шарів перебувають в ідентичному напруженому стані.

Тоді з (1) слідує, що

$$\begin{aligned}\sigma_1^{(1)} &= \sigma_1^{(2)} = \sigma_x \cos^2 \varphi; \\ \sigma_2^{(1)} &= \sigma_2^{(2)} = \sigma_x \sin^2 \varphi; \\ \tau_{12}^{(1)} &= -\tau_{12}^{(2)} = -\sigma_x \sin \varphi \cos \varphi.\end{aligned}\quad (2)$$

Користуючись критерієм максимальних напружень за методикою, що викладена, наприклад, у роботі [25], знайдемо границі міцності

$$\begin{aligned}F_{xp} &= \min \left\{ \frac{F_{1p}}{\cos^2 \varphi}; \frac{F_{2p}}{\sin^2 \varphi}; \frac{F_{12}}{|\sin \varphi \cos \varphi|} \right\}; \\ F_{xc} &= \min \left\{ \frac{F_{1c}}{\cos^2 \varphi}; \frac{F_{2c}}{\sin^2 \varphi}; \frac{F_{12}}{|\sin \varphi \cos \varphi|} \right\}.\end{aligned}\quad (3)$$

При розтягуванні по осі x шаруватих композиційних матеріалів з кутами укладання 30° , 45° і 60° перший вираз (3) приймає вид

$$\begin{aligned}F_{30}^p &= \min \left\{ \frac{4}{3} F_{1p}; 4F_{2p}; \frac{4}{\sqrt{3}} F_{12} \right\}; \\ F_{45}^p &= \min \{ 2F_{1p}; 2F_{2p}; 2F_{12} \}; \\ F_{60}^p &= \min \left\{ 4F_{1p}; \frac{4}{3} F_{2p}; \frac{4}{\sqrt{3}} F_{12} \right\}.\end{aligned}\quad (4)$$

На рис. 3 показано типові графіки залежностей (3), звідки слідує, що для визначення границь міцності умовного моношару необхідно знати положення точок перетинання кривих щодо кутів 30° , 45° і 60° . Більшість полімерних односпрямованих композиційних матеріалів характеризуються тим, що їх границі міцності $F_{2p} < F_{12}$ та $F_{2c} > F_{12}$. Саме такий варіант співвідношення властивостей показаний на рис. 3.

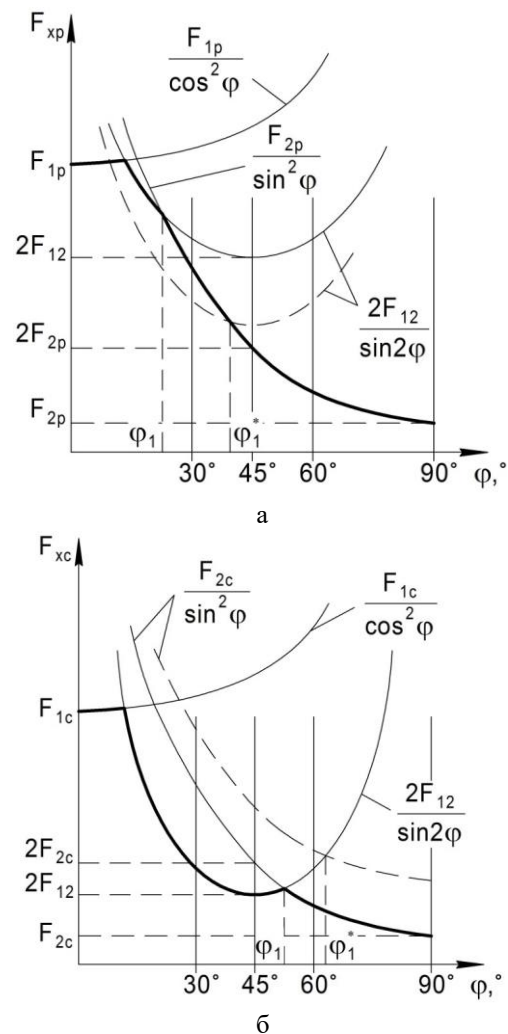


Рис. 3. Залежність границі міцності від кута армування

На рис. 3, а показано два різні випадки розташування кривої $2F_{12}/\sin 2\varphi$. Якщо кут

$$\varphi_1 = \arctg \frac{F_{2p}}{F_{12}} < \pi/6, \quad (5)$$

то міцність композиційного матеріалу при розтягуванні по осі x визначається тільки несучою спроможністю поперек волокон, і на всьому інтервалі $\pi/6 \leq \varphi \leq \pi/2$ з рівнянь (4) одержуємо три можливі значення границі міцності F_{2p} :

$$F_{2p} = \left\{ \frac{1}{4} F_{30}^p; \frac{1}{2} F_{45}^p; \frac{3}{4} F_{60}^p \right\}. \quad (6)$$

Так як ці значення повинні бути теоретично однаковими (з точністю до розкиду експериментальних даних, що допускається), то залежність (6) може служити не тільки для визначення границі міцності F_{2p} , але й для обґрунтування правомочності використання критерію максимальних напружень для оцінювання міцності розглянутих композиційних матеріалів.

Якщо умова (5) не виконується, то з залежностей (4) одержуємо дві характеристики композиційного матеріалу (рис. 3, а)

$$\begin{aligned} F_{2p} &= \left\{ \frac{1}{2} F_{45}^p; \frac{3}{4} F_{60}^p \right\}; \\ F_{12} &= \frac{\sqrt{3}}{4} F_{30}^p. \end{aligned} \quad (7)$$

При стисканні по осі x замість залежностей (4) слід записати

$$\begin{aligned} F_{30}^c &= \min \left\{ \frac{4}{3} F_{1c}; 4F_{2c}; \frac{4}{\sqrt{3}} F_{12} \right\}; \\ F_{45}^c &= \min \{ 2F_{1c}; 2F_{2c}; 2F_{12} \}; \\ F_{60}^c &= \min \left\{ 4F_{1c}; \frac{4}{3} F_{2c}; \frac{4}{\sqrt{3}} F_{12} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис. 3, б показано два різні варіанти кривої $F_{2p}/\sin^2 \varphi$. Положення кута φ_1 визначається співвідношенням

$$\varphi_1 = \arctg \frac{F_{2c}}{F_{12}}. \quad (9)$$

Якщо $\varphi_1 < \pi/3$, то з (7) слідує, що

$$\begin{aligned} F_{2c} &= \frac{3}{4} F_{60}^c; \\ F_{12} &= \left\{ \frac{\sqrt{3}}{4} F_{30}^c; \frac{1}{2} F_{45}^c \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

В іншому випадку, коли $\varphi_1 > \pi/3$, міцність композиційного матеріалу при стисканні по осі x залежить тільки від міцності моношару при зсуві

$$F_{12} = \left\{ \frac{\sqrt{3}}{4} F_{30}^c; \frac{1}{2} F_{45}^c; \frac{\sqrt{3}}{4} F_{60}^c \right\}. \quad (11)$$

Характеристики міцності F_{1p} , F_{1c} , F_{2p} , F_{2c} , F_{12} залежать від об'ємного вмісту, який змінний по куту армування плетеного рукава. Це означає, що формально в кожній із залежностей (4) і (8) необхідно використовувати свої границі міцності односпрямованого композиційного матеріалу, наприклад, F_{1p30} , F_{1p45} . Тоді поставлена задача стає принципово нерозв'язною при використанні критерію максимальних напружень.

Отримані по формулах (6), (7) значення деяких границь міцності не гарантують проходження графіка $F_{xp}(\varphi)$ через точки F_{30}^p , F_{45}^p і F_{60}^p . Якщо в процесі експериментів вдалося б однозначно встановити характер руйнування (розрив волокон, руйнування зв'язуючого між волокнами внаслідок розтягування або від зсуву), то це дало б можливість скорегувати залежності (6) та (7). Аналогічні судження застосовні і до аналізу результатів випробування композиційного матеріалу на стискання.

На основі критерію Мізеса – Хілла границя міцності композиційного матеріалу уздовж рукава може бути спрогнозована формулами [25]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{xp}^2} &= \frac{\cos^4 \varphi}{F_{1p}^2} + \frac{\sin^4 \varphi}{F_{2p}^2} - \frac{\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{F_{1p} F_{2p}} + \frac{\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{F_{12}^2}; \\ \frac{1}{F_{xc}^2} &= \frac{\cos^4 \varphi}{F_{1c}^2} + \frac{\sin^4 \varphi}{F_{2c}^2} - \frac{\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{F_{1c} F_{2c}} + \frac{\sin^2 \varphi \cos^2 \varphi}{F_{12}^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Якщо відомі експериментальні значення границь міцності для структур з армуванням 30° , 45° і 60° , то можна скласти дві системи рівнянь для обчислення величин F_{1p} , F_{1c} , F_{2p} , F_{2c} і F_{12} :

$$\left. \begin{aligned} \frac{9}{F_{1p}^2} + \frac{1}{F_{2p}^2} - \frac{3}{F_{1p} F_{2p}} + \frac{3}{F_{12}^2} &= \frac{16}{F_{30}^p{}^2}; \\ \frac{1}{F_{1p}^2} + \frac{9}{F_{2p}^2} - \frac{3}{F_{1p} F_{2p}} + \frac{3}{F_{12}^2} &= \frac{16}{F_{45}^p{}^2}; \\ \frac{1}{F_{1p}^2} + \frac{9}{F_{2p}^2} - \frac{3}{F_{1p} F_{2p}} + \frac{3}{F_{12}^2} &= \frac{16}{F_{60}^p{}^2}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{9}{F_{1c}^2} + \frac{1}{F_{2c}^2} - \frac{3}{F_{1c} F_{2c}} + \frac{3}{F_{12}^2} &= \frac{16}{F_{30}^c{}^2}; \\ \frac{1}{F_{1c}^2} + \frac{9}{F_{2c}^2} - \frac{3}{F_{1c} F_{2c}} + \frac{3}{F_{12}^2} &= \frac{16}{F_{45}^c{}^2}; \\ \frac{1}{F_{1c}^2} + \frac{9}{F_{2c}^2} - \frac{3}{F_{1c} F_{2c}} + \frac{3}{F_{12}^2} &= \frac{16}{F_{60}^c{}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Вирішенням цих рівнянь є наступні формули:

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{1p}^2} &= \frac{3}{F_{30}^{p2}} - \frac{3}{F_{45}^{p2}} + \frac{1}{F_{60}^{p2}}; \\ \frac{1}{F_{2p}^2} &= \frac{1}{F_{30}^{p2}} - \frac{3}{F_{45}^{p2}} + \frac{3}{F_{60}^{p2}}; \\ \frac{1}{F_{12}^2} &= \frac{1}{F_{1p}F_{2p}} + \frac{10}{F_{45}^{p2}} - \frac{4}{F_{30}^{p2}} - \frac{4}{F_{60}^{p2}}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{F_{1c}^2} &= \frac{3}{F_{30}^{c2}} - \frac{3}{F_{45}^{c2}} + \frac{1}{F_{60}^{c2}}; \\ \frac{1}{F_{2c}^2} &= \frac{1}{F_{30}^{c2}} - \frac{3}{F_{45}^{c2}} + \frac{3}{F_{60}^{c2}}; \\ \frac{1}{F_{12}^2} &= \frac{1}{F_{1c}F_{2c}} + \frac{10}{F_{45}^{c2}} - \frac{4}{F_{30}^{c2}} - \frac{4}{F_{60}^{c2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Так як границю міцності F_{12} можна знайти як з залежностей (15), так і з (16), то це може послужити оцінкою адекватності застосування критерію Мізеса – Хілла та коректності проведення експериментів.

Використання поліноміальних формулювань критеріїв міцності, що наводяться у роботах [23, 24] є кращим, тому що крива міцності для будь-якого подібного критерію буде проходити через точки F_{30}^p , F_{45}^p , F_{60}^p , а також через F_{1p} і F_{2p} . На рис. 4 показані графіки залежностей границь міцності при розтягуванні та стисканні від кута φ .

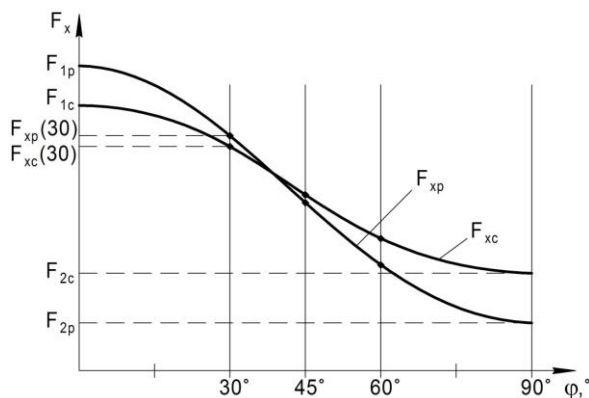


Рис. 4. Залежність границь міцності композиційного матеріалу від кута армування

Це дозволяє стверджувати, що в реалізованому інтервалі кутів $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$ [23, 24] практично будь-який поліноміальний критерій досить точно буде описувати міцність композита, армованого плетеним рукавом. У зв'язку із цим формули (15) і (16) у сукупності із критерієм Мізеса – Хілла в загальному виді

$$\frac{\sigma_{1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{\sigma_{1i}\sigma_{2i}}{F_{1i}F_{2i}} + \frac{\sigma_{2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{\tau_{12i}^2}{F_{12i}^2} \leq 1 \quad (17)$$

можуть використовуватися без особливих застережень. У нерівності (17)

$$F_{1i} = \begin{cases} F_{1pi}, & \sigma_{1i} > 0; \\ F_{1ci}, & \sigma_{1i} < 0; \end{cases} \quad F_{2i} = \begin{cases} F_{2pi}, & \sigma_{2i} > 0; \\ F_{2ci}, & \sigma_{2i} < 0. \end{cases} \quad (18)$$

У результаті вирішення систем рівнянь (13) і (14) із співвідношень (15), (16) визначаються деякі фіктивні границі міцності F_{1p} , F_{1c} , F_{2p} , F_{2c} і F_{12} .

Це пов'язане з тим, що кожному значенню кута φ відповідають свої фізико-механічні характеристики односпрямованого композиційного матеріалу. Але граничні криві міцності (рис. 4) обов'язково проходять через точки, що відповідають експериментальним даним, тому є підстави стверджувати, що можливі відхилення в інтервалі кутів $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$ будуть лежати в межах розкиду характеристик, які одержані шляхом випробувань (за аналогією з результатами, отриманими в роботах [23, 24] для пружних фізико-механічних характеристик).

Висновки

Дістала подальшого розвитку математична модель для прогнозування характеристик міцності композитів на основі плетених рукавів, для практичної реалізації якої досить провести випробування зразків матеріалу із трьома різними кутами між джгутами, наприклад, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ і $\pm 60^\circ$. Виведено необхідні розрахункові формули й рівняння для прогнозування характеристик міцності досліджуваних композитів при будь-якому куті армування. Отримані результати є основою для вирішення задач розрахунку на міцність будівельних конструкцій із композиційних матеріалів на основі плетених преформ.

Література

1. Кондратьєв А.В. Энергозберігаюча технологія виготовлення елементів будівельних конструкцій із полімерних матеріалів / А.В. Кондратьєв, О.О. Пронцевич // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2021. – №. 1. – С. 13–20.
2. Задорожнікова І.В. Методи та способи застосування складних полімерів при підсиленні залізобетонних конструкцій / І.В. Задорожнікова, С.П. Кух // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – 2017. – №8. – С. 81–86.
3. Shantha Kumar D. Experimental investigation on flexural behavior of concrete beam with glass fibre reinforced polymer rebar as internal reinforcement / Shantha Kumar D., Rajkumar R. // International Journal of Chemical Sciences. – 2016. – No. 14(S1). – P. 319–329.

4. Минасян З.А. Обзор технологий изготовления и методов оценки свойств плетеных изделий / З.А. Минасян, А.Р. Папоян, Э.А. Манукян, Н.К. Манасян, В.Г. Мурадян // *Вестник науки и образования*. – 2020. – № 18(96). – С. 20–30.
5. Андреев А.В. Концепция технологического обеспечения создания эффективных конструкций отечественных гражданских самолетов из полимерных композиционных материалов в современных условиях / А.В. Андреев, В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, О.В. Орлов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2017. – № 3(138). – С. 64–76.
6. Власенко Ф.С. Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) / Ф.С. Власенко, А.Е. Раскутин, К.И. Донецкий // *Труды ВИАМ*. – 2015. – №1. – С. 20–29. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5>.
7. Коротков И.А. Строительство бетонно-композитных мостов / И.А. Коротков, А.В. Борцев, Р.Ю. Караваев, Ф.С. Власенко // *Труды ВИАМ*. – 2015. – №1. – С. 38–42.
8. Раскутин А.Е. Арочные мосты с применением углепластиковых арочных элементов / А.Е. Раскутин, А.А. Евдокимов, С.И. Мишкин, Е.С. Михалдыкин // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2019. – № 2. – С. 22–29.
9. Пат. US20060174549A1 (2006) Rapidly-deployable lightweight load resisting arch system / H. Dagher, E. Landis, Imad El Chiti. 10.08.2006. <https://patents.google.com/patent/US20060174549/>
10. Пат. US20070175577A1 (2006) Composite construction members and method of making / H. Dagher, J. Tomblin, R. Nye, I. Chiti, M. Bodwell, A. Baker, R. Lopez-Anido. 12.10.2010. <https://patents.google.com/patent/US20070175577>
11. Lomov S.V. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results / S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, D.S. Ivanov, D. Mungalov, M. Karahan, I. Verpoest // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40, Iss. 8. – P. 1134–1143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.03.012>
12. Ivanov D.S. A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results / D.S. Ivanov, S.V. Lomov, A.E. Bogdanovich, M. Karahan, I. Verpoest // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40, Iss. 8. – P. 1144–1157. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.032>
13. Zdraveva E. Multifunctional Braided Composite Rods for Civil Engineering Applications / E. Zdraveva, C. Gonilho-Pereira, R. Figueiro, S. Lanceros-Mendez, S. Jalali, M. Araújo // *Advanced Materials Research*. – 2010. Vol. 123–125. – P. 149–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.149>
14. Okano M. Effect of the braiding angle on the energy absorption properties of a hybrid braided FRP tube / M. Okano, K. Sugimoto, H. Saito, A. Nakai, H. Hamada // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L*. – 2005. – Vol. 219, Iss. 1. – P. 59–66. <https://doi.org/10.1243/146442005X10256>
15. Erber A., Drechsler K. Torsional performance and damage tolerance of braiding configurations / A. Erber, K. Drechsler // *JEC Composites Magazine*. – 2009. – No. 46. – P. 42–45.
16. Arnold W. Characterization of Triaxial Braided Composite Material Properties for Impact Simulation / W. Arnold, A. William, B. Wieslaw, G. Robert, K. Lee, L. Justin, R. Gary // *65-th American Helicopter Society International Annual Forum*. – 2009. – Vol. 2. – P. 912–933.
17. Томилова М.В. Исследование свойств плетеных полотен при одноосном растяжении / М.В. Томилова, Н.А. Смирнова, В.В. Хамматова // *Вестник технологического университета*. – 2016. – Т. 19. – № 8. – С. 88–89.
18. Андреев А.В. Методика определения структурных параметров композитов, армированных плетеными рукавами / А.В. Андреев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2010. – Вып. 47. – С. 99–104.
19. Ершов С.В. Определение угла армирования плетеных преформ методом анализа изображений / С.В. Ершов, Е.Н. Калинин, В.Б. Кузнецов, Е.Н. Никифорова // *Вестник Череповецкого государственного университета*. – 2017. – №4. – С. 14–20. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2017-4-79-2>
20. Nishimoto H. Prediction Method for Temporal Change in Fiber Orientation / H. Nishimoto, A. Ohtani, A. Nakai, H. Hamada // *Textile Res J*. – 2010. – Vol. 80 (9). – P. 814–821.
21. Zhenkai W. Measurement Technique for Three-Dimensional Braided Composite Material Preform Using Mathematical Morphology and Image Texture / W. Zhenkai, L. Jialu, A. Braided // *AUTEX Research Journal*. – 2006. – Vol. 6(1). – P. 30–39.
22. Донецкий К.И. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ / К.И. Донецкий, Д.И. Коган, А.В. Хрульков // *Труды ВИАМ*. – 2014. – №3. – С. 17–23. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5>
23. Андреев А.В. Моделирование упругих и прочностных свойств композитов, армированных плетеными рукавами / А.В. Андреев, Я.С. Карпов // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 2010. – Вып. 4(64). – С. 7–10.
24. Карпов Я.С. Реализация методики прогнозирования физико-механических характеристик композита на основе плетеных рукавов / Я.С. Карпов, А.В. Андреев // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – 2012. – Вып. 4(72). – С. 161–165.
25. Карпов Я.С. Механика композиционных материалов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т». – 2001. – 122 с.
26. Vasiliev V.V. *Advanced Mechanics of Composite Materials* / V.V. Vasiliev, E.V. Morozov. – Elsevier, 2007. – 504 p.

References

1. Kondratiev A.V., Pronceovich O.O. (2021). Energozberigajucha tehnologija vigotovlennja elementiv budivelnih konstrukcij iz polimernih materialiv. *Visnik Pridniprovskoi derzhavnoi akademii budivnictva ta arhitekturi*, 1, 13–20.
2. Zadorozhnikova I.V., Kuh S.P. (2017). Metodi ta sposobi zastosuvannja skladnih polimeriv pri pidsilenni zalizobetonnih konstrukcij. *Suchasni tehnologii ta metodi rozrahunkiv u budivnictvi*, 8, 81–86.
3. Shantha Kumar D., Rajkumar R. (2016). Experimental investigation on flexural behavior of concrete beam with glass

fibre reinforced polymer rebar as internal reinforcement. *International Journal of Chemical Sciences*, 14(S1), 319–329.

4. Minasjan Z.A., Papojan A.R., Manukjan Je.A., Manasjan N.K., Muradjan V.G. (2020). Obzor tehnologij izgotovljenja i metodov ocenki svojstv pletenih izdelij. *Vestnik nauki i obrazovanija*, 18(96). 20–30.

5. Andreev A.V., Gajdachuk V.E., Kondratiev A.V., Orlov O.V. (2017). Konceptija tehnologicheskogo obespechenija sozdaniya jeffektivnyh konstrukcij otechestvennyh grazhdanskih samoletov iz polimernyh kompozicionnyh materialov v sovremennyh uslovijah. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 3(138). 64–76.

6. Vlasenko F.S., Raskutin A.E., Doneckij K.I. (2015). Primenenie pletenih preform dlja polimernyh kompozicionnyh materialov v grazhdanskih otrasljah promyshlennosti (obzor). *Trudy VIAM*, 1, 20–29. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5>.

7. Korotkov I.A., Borshhev A.V., Karavaev R.Ju., Vlasenko F.S. (2015). Stroitel'stvo betonno-kompozitnyh mostov. *Trudy VIAM*, 1, 38–42.

8. Raskutin A.E., Evdokimov A.A., Mishkin S.I., Mihalydykin E.S. (2019). Arochnye mosty s primeneniem ugleplastikovyh arochnyh jelementov. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*, № 2, 22–29.

9. Pat. US20060174549A1 (2006) *Rapidly-deployable lightweight load resisting arch system* / H. Dagher, E. Landis, Imad El Chiti. 10.08.2006. <https://patents.google.com/patent/US20060174549/>

10. Pat. US20070175577A1 (2006) *Composite construction members and method of making* / H. Dagher, J. Tomblin, R. Nye, I. Chiti, M. Bodwell, A. Baker, R. Lopez-Anido. 12.10.2010. <https://patents.google.com/patent/US20070175577>

11. Lomov S.V., Bogdanovich E., Ivanov D.S., Mungalov D., Karahan M., Verpoest I. (2009). A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 1: Materials, methods and principal results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 8, 1134–1143. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.03.012>

12. Ivanov D.S., Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Karahan M., Verpoest I. (2009). A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 8, 1144–1157. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.04.032>

13. Zdraveva E., Gonilho-Pereira C., Figueiro R., Lanceros-Mendez S., Jalali S., Araújo M. (2010). Multifunctional Braided Composite Rods for Civil Engineering Applications. *Advanced Materials Research*, 123 – 125, 149–152. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.149>

14. Okano M., Sugimoto K., Saito H., Nakai A., Hamada H. (2005). Effect of the braiding angle on the energy absorption properties of a hybrid braided FRP tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part L*, 219, 1, 59–66. <https://doi.org/10.1243/146442005X10256>

15. Erber A., Drechsler K. Drechsler K. (2009). Torsional performance and damage tolerance of braiding configurations. *JEC Composites Magazine*, 46, 42–45.

16. Arnold W., William A., Wieslaw B., Robert G., Lee K., Justin L., Gary R. (2009). Characterization of Triaxial Braided

Composite Material Properties for Impact Simulation. *65-th American Helicopter Society International Annual Forum*, 2, 912–933.

17. Tomilova M.V., Smirnova N.A., Hammatova V.V. (2016). Issledovanie svojstv pletenih poloten pri odnoosnom rastjazhenii. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*, 19, 8, 88–89.

18. Andreev A.V. (2010). Metodika opredelenija strukturnyh parametrov kompozitov, armirovannyh pletenymi rukavami. *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, 47, 99–104.

19. Ershov S.V., Kalinin E.N., Kuznecov V.B., Nikiforova E.N. (2017). Opredelenie ugla armirovanija pletenih preform metodom analiza izobrazhenij. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta*, 4, 14–20. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2017-4-79-2>

20. Nishimoto H., Ohtani A., Nakai A., Hamada H. (2010). Prediction Method for Temporal Change in Fiber Orientation. *Textile Res J*, 80 (9), 814–821.

21. Zhenkai W., Jialu L., Braided A. (2006). Measurement Technique for Three-Dimensional Braided Composite Material Preform Using Mathematical Morphology and Image Texture. *AUTEX Research Journal*, 6(1), P. 30–39.

22. Doneckij K.I., Kogan D.I., Hrul'kov A.V. (2014). Svojstva polimernyh kompozicionnyh materialov, izgotovlennyh na osnove pletenih preform. *Trudy VIAM*, 3, 17–23. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5>

23. Andreev A.V., Karpov Ja.S. (2010). Modelirovanie uprugih i prochnostnyh svojstv kompozitov, armirovannyh pletenymi rukavami. *Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov*, 4(64), 7–10.

24. Karpov Ja.S., Andreev A.V. (2012). Realizacija metodiki prognozirovaniya fiziko-mehaničeskikh harakteristik kompozita na osnove pletenih rukavov. *Voprosy proektirovanija i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov*, 4(72), 161–165.

25. Karpov Ja.S. (2001). *Mehanika kompozicionnyh materialov*. Kharkiv: National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” Publ., 247.

26. Vasiliev V.V., Morozov E.V. (2007). *Advanced Mechanics of Composite Materials*. Elsevier, 504.

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.В. Воронько, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна.

Автор: КОНДРАТЬЄВ Андрій Валерійович
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – andrii.kondratiev@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8101-1961>

Автор: АНДРЕЄВ Олексій Вікторович
кандидат технічних наук, заступник Головного інженера (з композиційного виробництва)
Державне підприємство «Антонов»
E-mail – andreev@antonov.com

FORECASTING CHARACTERISTICS OF COMPOSITE STRENGTH ON THE BASIS OF PREFORMS IN ELEMENTS OF BUILDING STRUCTURES

A.V. Kondratiev¹, O.V. Andrieiev²

¹ O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

² ANTONOV COMPANY, Ukraine

Currently, wicker composite structures for various purposes are widely used in many industries. The use of such preforms allows to provide the possibility of automation of production, high speed and efficiency of the process of manufacturing polymeric composite materials and structures based on them. Knowledge of their properties allows you to optimize the production of structures with the necessary parameters during design. In the article the model of composite material on the basis of wicker reinforcement was further developed. For the practical implementation of this model, it is sufficient to test material samples with three different angles between the harnesses, for example, $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ and $\pm 60^\circ$. A mathematical description of the model is given. The model made it possible to predict the physical and mechanical characteristics of the composite material when it is laid out on curved surfaces. At the same time some fictitious limits of durability of a composite are defined. This is due to the fact that each value of the angle between the harnesses corresponds to its physical and mechanical characteristics of the unidirectional composite material. In this case, the ultimate strength curves necessarily pass through the points corresponding to the experimental data. The article shows that the possible deviations of the strength limits in the range of angles between the harnesses will lie within the range of characteristics obtained by testing. The article shows that in the realized interval of angles between the harnesses, almost any polynomial criterion of strength will accurately describe the strength of the composite reinforced with a braided sleeve. The obtained parameters, in contrast to the existing ones, allow to predict the strength characteristics of the composite on the basis of braided sleeves depending on the positioning and location of the material on the forming surface. The obtained results are the basis for solving the problems of calculating the strength of building structures from composite materials based on wicker preforms.

Keywords: preform, premix, reinforcing material, angle between harnesses, strength criterion, test.